

ASTRONOMIJA

Nuklearna astrofizika i radioaktivni snopovi

Matko Milin, IRB, Zagreb

Nuklearna astrofizika

Nuklearna astrofizika dio je fizike čiji je glavni zadatak razumijevanje nastanka energije i sinteze elemenata u zvijezdama i ranom svemiru. Da bi se shvatilo oba procesa nužno je poznavati bitne nuklearne reakcije. U "mirnim" zvijezdama (poput našeg Sunca) i općenito, u neeksplozivnim zvjezdanim fazama, brzina kojom se nuklearne reakcije odvijaju puno je manja od prosječne brzine radioaktivnog raspada prisutnih jezgara i takve se reakcije već dugi niz godina proučavaju uporabom akceleratorskih snopova stabilnih jezgara.

Najveći problem ovakvih istraživanja je nemogućnost direktnog mjerenja nuklearnih reakcija na niskim energijama ($\approx 10\text{keV}$) koje odgovaraju temperaturama u središtima zvijezda ($\approx 10^7\text{K}$). Naime, reakcije na niskim energijama su zbog Coulombove sile među nabijenim jezgrama malobrojne, pa ih je današnjim akceleratorskim postrojenjima nemoguće mjeriti; šum, odnosno smetnje koje dolaze od kozmičkog zračenja, prirodne radioaktivnosti i drugog, previše ometaju mjerenja. Standardni postupak je stoga mjerenje na višim energijama te upotreba teorijskog modela kojim se ekstrapoliraju dobiveni rezultati na niže, astrofizički zanimljive energije. Takva mjerenja su provedena za većinu interesantnih reakcija i dobiveni rezultati iskorišteni za izradu prilično uvjerljivih modela.

No, tijekom određenih "eksplozivnih" procesa u svemiru (eksplozija novih i supernovih zvijezda, provala x-zračenja, procesa u ranom svemiru i sl.), nuklearne reakcije se odvijaju toliko brzo da se čak ni stvorene radioaktivne jezgre ne stignu raspasti. U tom slučaju nuklearne reakcije među radioaktivnim jezgrama postaju vrlo bitne. Dakle, proučavanje navedenih eksplozivnih procesa zahtijeva poznavanje i nuklearnih reakcija kod kojih je barem jedna jezgra radioaktivna. Eksperimenti u kojima se proučavaju takve reakcije koriste snopove radioaktivnih (dakle, nestabilnih!) jezgara, a s njima nije lako baratati.

Radioaktivni nuklearni snopovi

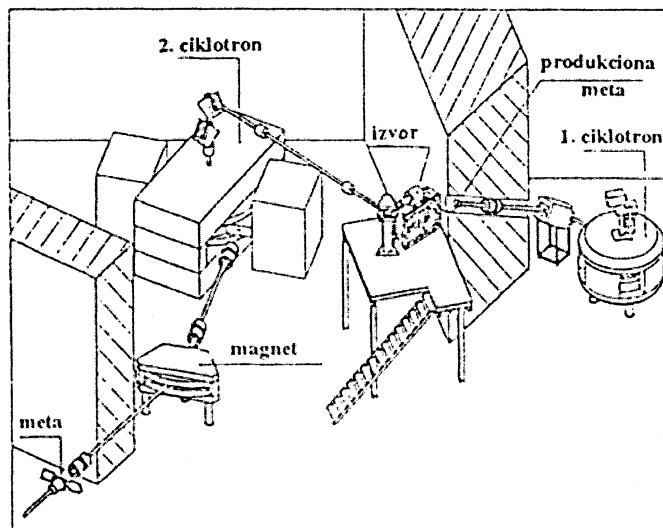
Snopovi radioaktivnih jezgara koriste se već dvadesetak godina, no tek je u zadnjih nekoliko godina tehnologija akceleratora, ionskih izvora i stupica, separatora, detektora, te sistema za prikupljanje podataka, toliko uznapredovala da se radioaktivni snopovi mogu efikasno upotrijebiti za velik broj istraživanja i primjena.

Razlikujemo dvije metode proizvodnje radioaktivnih snopova: prva se odvija *fragmentacijom projektila* (najčešće teških iona visokih energija) u kombinaciji sa separacijom nastalih fragmenata, a druga je *metoda reakceleracije* kod koje se radioaktivne jezgre proizvedene nuklearnim reakcijama na primarnoj meti usmjeravaju do ionskog izvora i nanovo ubrzavaju. Samo metodom reakceleracije moguće je proizvesti snopove energija bliskih energijama od astrofizičkog interesa.

U metodi reakceleracije nestabilni izotopi nastaju u reakcijama na primarnoj meti i odvajaju se na samoj akceleratorskoj liniji, a zatim ponovno ubrzavaju. U primarnom snopu koriste se protoni, α -čestice, spori neutroni ili drugi projektili. Protonski snop je zbog vrlo velikog intenziteta koji se može postići najefektivniji, no za određen broj željenih radioaktivnih snopova nije prikladan. Za sekundarno ubrzavanje stvorenih nestabilnih jezgara koriste se ciklotroni i linearni akceleratori. Iako je proizvodnja snopova putem ponovnog ubrzavanja kompliciranija nego kod metode fragmentacije

projektila, tako proizvedeni radioaktivni snopovi imaju kvalitetu praktički jednaku normalnim snopovima. No, ovom metodom nemoguće je ubrzavati izotope vremena poluraspada kraćeg od jedne sekunde bez vrlo značajnog gubitka intenziteta. Čak i uz tu restrikciju, metoda reakceleracije je vrlo zanimljiva za mnoga istraživanja u nuklearnoj astrofizici i niskoenergijskoj nuklearnoj fizici.

Prvo postrojenje za reakceleraciju konstruirano je u Louvain-la-Neuveu (Belgija), gdje je 1989. godine najprije ubrzan snop ^{13}N jezgri. Danas se može ubrzavati više različitih snopova radioaktivnih izotopa, u opsegu od ^6He do ^{35}Ar . Postrojenje uključuje 2 ciklotrona, ionski izvor i standardni sistem za vođenje snopa.



Sl. 1. Postrojenje za proizvodnju radioaktivnog nuklearnog snopa u Louvain-la-Neuveu.

Protonski snop energije 30 MeV dobiven iz prvog ciklotrona usmjerava se na metu pogodnu za proizvodnju velikih količina željenih nestabilnih jezgara. Stvorene jezgre izlaze iz mete, ioniziraju se u ionskom izvoru i nakon prolaska kroz analizatorski magnet injektiraju u drugi ciklotron. Da bi se odvojile neželjene plinovite primjese (kao što su H_2O , N_2 , CO_2 i ugljikovodici), prije ulaska u drugi ciklotron postavljaju se kriogenske zamke s temperaturom od 20 K.

Danas već djeluju (ili su u fazi ispitivanja) i ubrzivači u Oak Ridgeu, Caenu i Tokiju. Predviđena su i postrojenja u Vancouveru, Cataniji, te u CERN-u (Ženeva).

Zaključak

Već je W.A.Fowler 1983. godine, u predavanju koje je održao povodom primanja Nobelove nagrade za svoj doprinos u razvoju nuklearne astrofizike, istaknuo da je budućnost tog dijela fizike u upotrebi radioaktivnih nuklearnih snopova. I zaista, nastanak srednjih i teških jezgara ne bi se mogao objasniti bez poznavanja procesa koji uključuju velik broj nestabilnih izotopa. Radioaktivni snopovi su nadalje korisni za proučavanje normalnog nuklearnog gorenja (lakih jezgara) u zvijezdama. Također, mnogi dugo neriješeni problemi nuklearne astrofizike (problem Sunčevih neutrina, prvobitna nukleosinteza i dr.) usko su povezani s reakcijama koje uključuju radioaktivne izotope.

Mogućnost rada s radioaktivnim snopovima omogućit će bolje razumijevanje svih spomenutih procesa, a možda i definitivni odgovor na neke od otvorenih pitanja.